



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

稀土材料学

刘光华 主编



化学工业出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

稀 土 材 料 学

刘光华 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

稀土材料的诸多优异性能使其在国民经济、国防建设和现代科学技术的各个领域有着广泛的应用。本书全面系统地介绍了各类稀土材料（既包括稀土功能材料也包括稀土结构材料）的组成、结构、性能、制备及应用知识。分章论述了稀土金属和合金材料、稀土磁性材料、稀土发光和激光材料、稀土玻璃陶瓷材料、稀土热电和电子发射材料、稀土催化材料、稀土储氢材料和核材料、稀土超导材料、稀土高分子材料、钷及其材料应用等。同时对稀土资源开发、材料用稀土化合物以及稀土材料各领域中涌现出的新理论、新方法、新工艺和新应用也做了详尽的介绍。

本书可作为高等院校材料类、化学与化工类及相关专业的本科生和研究生的教学用书和参考书，也可供有关科研院所、厂矿企业的广大科研人员、工程技术人员及管理人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

稀土材料学/刘光华主编. —北京: 化学工业出版社,
2007.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-01022-3

I. 稀… II. 刘… III. 稀土金属-金属材料-高等学校-
教材 IV. TG146.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 132351 号

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 潘 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 27 $\frac{1}{4}$ 字数 712 千字 2007 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

前 言

我国盛产稀土元素，储量、产量和出口量均居世界首位，因此是我国的一大资源和产业优势。稀土元素由于其结构的特殊性而具有诸多其他元素所不具备的光、电、磁、热等特性，从而可以用来制备成许多能用于高新技术的新材料。因此，稀土元素被誉为新材料的“宝库”，是国内外科学家，尤其是材料学家最关注的一组元素，被美国、日本等发达国家有关政府部门列为发展高新技术产业的关键元素和战略物资。使用了稀土的新材料已广泛地应用到国民经济、国防建设和现代科学技术的各个领域，并促进了这些领域的发展。随着对稀土基础研究的深入和产业的发展，稀土材料已从分散的应用知识逐步走上了以材料科学为主导的发展道路，形成了一个相应的新兴学科领域——稀土材料学。它是一个科学技术含量很高、前瞻性很强、多学科交叉的新兴学科，国内不少大学的本科高年级学生和研究生都开设有稀土材料类课程，但缺乏专用教材。作者一直密切关注和跟踪着稀土材料学科的发展，集多年教学和科研的实践经验，撰写了这部《稀土材料学》教材，以期能满足稀土材料学科及其产业发展对创新人才培养的需要。

《稀土材料学》全面、系统地介绍了各类稀土材料的组成、结构、性能、制备和应用知识。这些材料既包括稀土结构材料，又包括稀土功能材料，具体有：稀土金属与合金材料、稀土永磁材料、稀土发光与激光材料、稀土玻璃与陶瓷材料、稀土热电与电子发射材料、稀土催化材料、稀土储氢材料与核能材料、稀土超导材料、稀土高分子材料以及钍资源与材料应用等，并对稀土资源的开发应用和稀土材料制备技术也作了详尽的介绍。本书具有如下显著特点。①以促进国民经济和高新科技发展为目标，取材新颖、内容丰富、自成体系，涵盖了稀土材料方面的基础理论及新兴领域的最新成果，同时兼顾学科的系统性和针对性，具有较强的前瞻性。②以稀土元素特殊结构与新材料性能关系为主线，在研究各类稀土材料的成分、结构、性能及其制备方法的基础上，探索各种稀土金属及其化合物作为材料实际应用的可能性。对稀土材料的设计、研制、开发、生产及应用中涌现出来的新理论、新技术、新方法和新工艺展开了有启发性的探讨。③提出了稀土资源开发、材料制备和实际应用紧密结合的发展原则以及技术创新的思路，以充分发挥我国稀土资源和产业优势，大力提升我国稀土材料开发与应用水平。④理论联系实际，学用结合，各章既包含有扎实的基础知识，又有丰富的稀土材料制备和应用实例，体现了从基础理论出发，指导各类稀土材料的研发与生产、解决稀土材料生产制备与使用过程中的实际问题，为培养和提高学生的综合素质、解决实际问题的能力和创新能力打下坚实的基础。本书可作为高等院校材料类、化学与化工类及相关专业的本科生和研究生的教学用书和参考书，也可供有关科研院所、工矿企业的广大科研人员、工程技术人员及管理人员阅读参考。21世纪新技术革命的来到，给稀土材料及其学科的发展创造了新的机遇，本教材的出版恰逢其时，希望能为我国经济建设的发展和人才培养做出微薄的贡献。

本书共分14章。参加编写的有刘光华（第1~3、7、10、11章），李永绣（第4章），吴炳乾和杨幼明（第5章），张萌（第6章），刘桂华（第8、9章），汪京荣（第12章），李样生（第13章），刘捷（第14章）。全书由刘光华统稿。本书的出版得到了南昌大学和化学工业出版社的大力支持和帮助，作者在此表示衷心的感谢！同时，对书中所引用文献资料的

中外作者致以诚挚的谢意!

稀土材料学这一新兴学科所涉及的内容非常广泛，且是多学科、多部门交叉和渗透，其发展又极为迅速，加上作者水平所限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

刘光华

2007年8月于南昌

目 录

第 1 章 稀土资源及其材料应用	1	3.2.2 稀土硼化物	38
1.1 稀土元素概述	1	3.2.3 稀土碳化物	40
1.1.1 稀土元素	1	3.2.4 稀土硅化物	40
1.1.2 稀土元素的分类	1	3.2.5 稀土氮化物	41
1.2 稀土矿物资源	2	3.2.6 稀土硫化物	42
1.2.1 自然界的稀土元素	2	3.2.7 稀土氧化物与氢氧化物	44
1.2.2 稀土元素在矿物中的赋存状态	3	3.2.8 稀土卤化物	47
1.2.3 稀土的主要工业矿物	3	3.3 稀土元素的几种含氧酸盐	48
1.2.4 世界稀土资源概况	7	3.3.1 稀土碳酸盐	48
1.3 稀土工业概况	8	3.3.2 稀土草酸盐	50
1.3.1 世界稀土工业简况	8	3.3.3 稀土硅酸盐	51
1.3.2 中国稀土工业的发展	9	3.3.4 稀土硝酸盐	51
1.4 稀土材料应用现状和展望	10	3.3.5 稀土磷酸盐	52
1.4.1 稀土在传统材料领域的应用	12	3.3.6 稀土硫酸盐	53
1.4.2 稀土在新材料领域的应用	13	3.3.7 稀土卤酸盐	54
第 2 章 稀土元素的结构与材料学性能	19	3.4 稀土元素配位化合物	55
2.1 稀土元素的结构特点与价态	19	3.4.1 稀土配合物的特性	55
2.1.1 稀土元素在周期表中处于特殊位置	19	3.4.2 稀土配合物的主要类型	57
2.1.2 稀土元素的电子层结构特点	19	3.4.3 稀土配合物的制备	58
2.1.3 稀土元素的价态	20	3.4.4 稀土与无机配体生成的配合物	59
2.2 稀土元素的晶体结构	21	3.4.5 稀土与有机配体生成的配合物	61
2.2.1 稀土金属晶体的室温结构	21	3.4.6 稀土多元配合物和多核配合物	67
2.2.2 稀土金属的同素异型转变	22	3.4.7 稀土金属有机化合物	69
2.3 稀土元素的物理化学性质	23	3.4.8 稀土配合物在材料领域的主要应用	75
2.3.1 稀土元素的一般物理性质	23	第 4 章 稀土材料的制备技术	77
2.3.2 稀土元素的电学性质	24	4.1 概述	77
2.3.3 稀土元素的光学性质	24	4.1.1 稀土材料制备过程与性能控制	78
2.3.4 稀土元素的磁学性质	28	4.1.2 稀土材料前驱体	79
2.3.5 稀土元素的化学性质	30	4.2 稀土分离与湿法冶金技术	80
2.4 稀土元素的材料学性能	32	4.2.1 从稀土矿中提取混合稀土	80
2.4.1 稀土元素的力学性能	32	4.2.2 稀土分离与高纯化技术	82
2.4.2 稀土金属的工艺学性能	33	4.3 稀土材料制备技术	93
2.5 稀土元素特性的材料学应用	33	4.3.1 材料设计	93
第 3 章 稀土化合物及其材料应用	35	4.3.2 组合材料学	94
3.1 稀土化合物的一般性质	35	4.3.3 稀土微纳米粉体材料制备技术	95
3.2 稀土元素的几种非金属化合物	37	4.3.4 稀土复合氧化物的合成与结构	107
3.2.1 稀土氢化物	37	4.3.5 稀土金属与合金材料制备技术	110

第 5 章 稀土金属及合金	113	6.3.3 稀土超磁致伸缩材料的性能	175
5.1 概述	113	6.3.4 稀土超磁致伸缩材料的应用	177
5.2 稀土金属合金的基本概念及热力学 计算	113	6.4 稀土磁致冷材料	179
5.2.1 稀土熔盐电解的电极过程	113	6.4.1 磁致冷的基本概念	179
5.2.2 熔盐电解过程热力学计算	114	6.4.2 稀土磁致冷材料的特性	180
5.2.3 热还原过程热力学计算	118	6.4.3 稀土磁致冷材料的应用	180
5.3 稀土氯化物的熔盐电解	119	6.5 稀土磁光材料	182
5.3.1 稀土氯化物熔盐电解质的性质与 组成	119	6.5.1 磁光效应	182
5.3.2 稀土氯化物熔盐电解的电极 过程	123	6.5.2 磁光材料制备技术	183
5.3.3 稀土氯化物熔盐电解的工艺 实践	124	6.5.3 几种稀土磁光材料及其应用	184
5.3.4 稀土氯化物熔盐电解的电流效率 及其影响因素	126	6.6 稀土磁泡材料	190
5.4 稀土氧化物-氯化物的熔盐电解	128	6.6.1 磁泡的结构与特性	190
5.4.1 稀土氧化物-氯化物熔盐电解的 基本原理	129	6.6.2 磁泡膜的制备	192
5.4.2 稀土氧化物-氯化物熔盐电解的 工艺实践	131	6.6.3 稀土磁泡材料及应用	193
5.4.3 稀土两种熔盐体系电解的比较	132	第 7 章 稀土发光和激光材料	194
5.5 熔盐电解法直接制取稀土合金	133	7.1 发光材料及其发光性能	194
5.5.1 液体阴极电解法制取稀土中间 合金	133	7.1.1 发光材料的基本概念	194
5.5.2 电解共析法制取稀土中间合金	134	7.1.2 发光材料的发光性能	196
5.5.3 固体自耗阴极电解法制取稀土 中间合金	135	7.2 稀土发光材料的性能特点	200
5.6 还原法制取稀土金属和合金	136	7.2.1 稀土离子的能级跃迁及光谱 特性	200
5.6.1 金属热还原法制取稀土金属	137	7.2.2 稀土发光材料的优异性能	202
5.6.2 金属热还原法直接制取稀土 合金	144	7.2.3 稀土发光材料的种类和应用	202
5.6.3 制取稀土金属的其他方法	148	7.3 稀土阴极射线发光材料	204
第 6 章 稀土磁性材料	150	7.3.1 稀土红色荧光粉	204
6.1 磁学基础	150	7.3.2 稀土绿色荧光粉	206
6.1.1 物质的磁性	150	7.3.3 稀土蓝色荧光粉	209
6.1.2 铁磁物质的特性	151	7.3.4 终端显示器用稀土荧光粉	210
6.1.3 磁性材料的种类和特性	152	7.3.5 稀土飞点扫描荧光体	212
6.2 稀土永磁材料	155	7.4 稀土光致发光材料	212
6.2.1 稀土永磁材料的种类	155	7.4.1 紧凑型荧光灯用稀土三基色 光粉	212
6.2.2 几种主要的稀土永磁材料	156	7.4.2 高压汞灯用稀土荧光粉	214
6.2.3 稀土永磁材料的应用	167	7.4.3 稀土金属卤化物灯荧光粉	214
6.3 稀土磁致伸缩材料	172	7.4.4 稀土长余辉发光材料	216
6.3.1 磁致伸缩效应及机理	173	7.5 稀土电致发光材料	220
6.3.2 稀土超磁致伸缩材料的制备	174	7.5.1 稀土无机电致发光材料	221
		7.5.2 稀土有机电致发光材料	223
		7.6 稀土 X 射线发光材料	224
		7.6.1 稀土激活的稀土钨酸盐	225
		7.6.2 稀土激活的硫氧化物	226
		7.6.3 稀土激活的卤氧化钨	226
		7.6.4 稀土激活的碱土氟卤化物	227
		7.6.5 CT 探测器用稀土发光材料	228
		7.6.6 稀土 PSL 材料	229
		7.7 其他稀土发光材料	230

7.7.1 稀土闪烁体	230	第9章 稀土热电和电子发射材料	289
7.7.2 稀土上转换发光材料	233	9.1 稀土热电材料	289
7.8 稀土激光材料	235	9.1.1 热电效应和热电材料	289
7.8.1 稀土激光原理	236	9.1.2 热电效应的基本原理	289
7.8.2 稀土固体激光材料	237	9.1.3 热电材料的结构与性能	291
7.8.3 稀土液体激光材料	242	9.1.4 热电材料的制备	295
7.8.4 稀土气体激光材料	243	9.1.5 热电材料的应用	295
7.8.5 用于激光技术中的其他稀土材料	244	9.2 稀土发热材料	298
第8章 稀土玻璃和陶瓷	246	9.2.1 概述	298
8.1 稀土玻璃概述	246	9.2.2 稀土发热材料的组成与结构	298
8.1.1 光学玻璃	246	9.2.3 稀土发热材料的制备	299
8.1.2 稀土玻璃组成及结构	246	9.2.4 稀土发热材料的性能	300
8.1.3 稀土在玻璃中的作用	247	9.2.5 稀土发热材料的应用	301
8.1.4 稀土有色玻璃	247	9.3 稀土阴极发射材料	302
8.2 稀土光学玻璃	248	9.3.1 概述	302
8.2.1 镧系光学玻璃	248	9.3.2 稀土-钨阴极发射材料	302
8.2.2 稀土光致变色玻璃	249	9.3.3 稀土氧化物阴极发射材料	303
8.3 稀土发光玻璃	249	9.3.4 六硼化钨阴极发射材料	304
8.4 稀土光学功能玻璃	250	第10章 稀土催化材料	307
8.4.1 稀土非线性光学功能玻璃	250	10.1 催化作用与稀土催化剂	307
8.4.2 稀土非线性光学功能玻璃的制备方法	252	10.1.1 催化作用	307
8.4.3 稀土红外-可见光上转换玻璃	252	10.1.2 催化剂的性能及分类	308
8.4.4 稀土磁光玻璃	253	10.1.3 稀土元素在催化剂中的作用	310
8.5 稀土玻璃光纤	255	10.2 稀土裂化催化剂	310
8.5.1 RE ₂ O ₃ 玻璃光纤	255	10.2.1 催化裂化的发展	310
8.5.2 稀土氟化物玻璃光纤	258	10.2.2 稀土裂化催化剂的性能	312
8.5.3 稀土玻璃光纤的应用	260	10.2.3 稀土沸石裂化催化剂的制备	312
8.6 稀土抛光材料	260	10.2.4 我国稀土裂化催化剂的发展	314
8.6.1 稀土抛光剂的抛光机理和抛光工艺	261	10.3 稀土尾气净化催化剂	315
8.6.2 稀土抛光粉的种类和制备方法	262	10.3.1 汽车尾气治理技术与稀土净化催化剂的发展	315
8.7 稀土陶瓷釉	263	10.3.2 稀土净化催化剂的分类	317
8.7.1 稀土陶瓷彩色釉	263	10.3.3 稀土在尾气净化催化剂中的作用	318
8.7.2 稀土高温彩色陶瓷釉	264	10.3.4 稀土净化催化剂的制备	319
8.8 稀土结构陶瓷	265	10.4 稀土合成橡胶催化剂	319
8.8.1 RE-ZrO ₂ 陶瓷	266	10.4.1 稀土合成橡胶催化剂的组成和影响活性的因素	320
8.8.2 RE-Si ₃ N ₄ 陶瓷	271	10.4.2 稀土合成橡胶的制备、结构和性能	322
8.8.3 RE-AlN 陶瓷	273	10.5 稀土化工催化材料	323
8.9 稀土功能陶瓷	275	10.5.1 稀土在化工催化材料中的作用	323
8.9.1 稀土压电陶瓷	276	10.5.2 稀土有机化工催化材料	324
8.9.2 稀土电光陶瓷	279	10.5.3 稀土无机化工催化材料	326
8.9.3 稀土离子导电陶瓷	281		
8.9.4 稀土敏感陶瓷	284		
8.9.5 稀土介电陶瓷	285		

第 11 章 稀土新能源材料	328	12.5.1 发展概况和驱动力	363
11.1 新能源及新能源材料	328	12.5.2 基带的选择	364
11.2 稀土储氢材料	328	12.5.3 缓冲层	366
11.2.1 氢能源及储氢方法	328	12.5.4 超导层的选择	367
11.2.2 储氢材料及其分类	329	12.5.5 工艺的改进	368
11.2.3 稀土储氢合金的储氢原理	330	12.6 超导电性应用	371
11.2.4 稀土储氢材料的制备方法	333	12.6.1 传输和配电网	374
11.2.5 稀土储氢材料的性能及其 优化	335	12.6.2 舰船推进用 HTS 电机进展	375
11.2.6 稀土储氢材料的应用	338	12.6.3 故障限流器 (FCL)	376
11.3 稀土核能材料	343	12.6.4 医用磁共振成像 (MRI) 和核磁 共振仪 (NMR)	377
11.3.1 核能的基本概念	343	12.6.5 变压器	377
11.3.2 核反应堆及其使用的材料	344	12.6.6 超导储能	377
11.3.3 核燃料元件材料	345	12.6.7 超导磁浮列车	378
11.3.4 稀土结构材料	346	第 13 章 稀土高分子材料	380
11.3.5 稀土控制材料	347	13.1 稀土高分子材料的主要类型	380
11.3.6 稀土慢化材料	349	13.1.1 掺杂型稀土高分子材料	380
11.3.7 反射层材料和屏蔽材料	349	13.1.2 键合型稀土高分子材料	381
11.3.8 稀土陶瓷绝缘材料	350	13.2 稀土高分子材料的制备及结构	381
第 12 章 稀土超导材料	351	13.2.1 稀土高分子材料的制备	381
12.1 超导电性和超导体	351	13.2.2 稀土高分子材料的结构	383
12.2 超导材料	352	13.3 稀土高分子材料的应用	384
12.2.1 金属元素超导体	352	13.3.1 稀土高分子光学材料	384
12.2.2 化合物超导体	352	13.3.2 稀土高分子防护材料	390
12.2.3 合金超导体	354	13.3.3 稀土高分子磁性材料	390
12.2.4 具有 NaCl 结构的化合物超 导体	354	13.3.4 稀土高分子材料助剂	392
12.2.5 A15 型化合物	354	第 14 章 钷及其材料应用	400
12.2.6 拉夫斯 (Laves) 相	355	14.1 钷的资源	400
12.2.7 谢弗尔 (Chevrel) 相	355	14.1.1 世界钷资源概况	400
12.2.8 其他超导体	356	14.1.2 中国的钷资源	401
12.3 氧化物超导材料	356	14.2 钷的提取和纯制	401
12.3.1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 系	357	14.2.1 钷原料的浸取	402
12.3.2 Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) 系	359	14.2.2 钷的分离提纯	402
12.3.3 Tl-Ba-Ca-Cu-O (TBCCO) 系	359	14.3 金属钷的制备	408
12.4 123 氧化物超导材料的制备	359	14.3.1 高纯金属钷的制备	408
12.4.1 顶部籽晶熔融织构法 (TSMTG)	360	14.3.2 特殊形式钷的制备	410
12.4.2 淬火熔化生长法 (QMG) 和熔 化粉末熔化生长法 (MPMG)	361	14.4 钷合金的制备	411
12.4.3 粉末熔化法 (PMP)	361	14.4.1 对掺法制备钷合金	411
12.4.4 液相消除法 (LPRM)	361	14.4.2 熔盐电解法制备钷合金	411
12.4.5 固相-液相熔化生长法 (SLMG)	361	14.4.3 金属热还原法制备钷合金	411
12.5 第二代 (2G) 高温超导线材	362	14.5 钷的性质	412
		14.5.1 钷的物理性质	412
		14.5.2 钷的化学性质	412
		14.6 钷的化合物	413

14.6.1	氢化钪	413	14.7.3	钪在石化催化材料中的应用	417
14.6.2	卤化钪	413	14.7.4	钪在电子信息材料中的应用	417
14.6.3	氧化钪	413	14.7.5	钪在电光源及激光材料中的 应用	418
14.6.4	氢氧化钪	415	14.7.6	钪在核工业材料中的应用	418
14.6.5	钪的其他化合物	416			
14.7	钪及其化合物的材料应用	416			
14.7.1	钪在金属材料中的应用	416	参考文献		419
14.7.2	钪在特种陶瓷材料中的应用	417			

第 1 章 稀土资源及其材料应用

1.1 稀土元素概述

1.1.1 稀土元素

稀土元素 (rare earth element) 是元素周期表中Ⅲ_B族中原子序数 21 的钪 (Sc)、39 的钇 (Y) 和 57 的镧 (La) 至 71 的镱 (Lu) 等 17 个元素的总称。根据国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 统一规定, 原子序数 57~71 的 15 个元素: 镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、铥 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu) 又称为镧系元素 (可用符号 “Ln” 表示), 它们同位于周期表的第 6 周期的 57 号位置上。在 17 个稀土元素中, 钪的化学性质与其他 16 个元素有较大的差别, 所以本书把钪及其材料应用单独列为一章进行介绍。为了叙述方便起见, 书中凡是提到 “稀土” 一词时, 一般仅指钪以外的稀土元素。稀土元素可简称稀土, 常用符号 “RE” 表示。另外, 钷是一种放射性元素, 在自然界存在极少, 常见的稀土矿物中一般都不含钷。所以, 通常的稀土研究、生产和应用中也不包括钷。

稀土元素的发现, 最早是 1794 年, 在 Abo 大学工作的芬兰著名化学家加多林 (J. Gadolin) 从硅铍钇矿中发现 “钇土” (Yttria) 即氧化钇开始的。由于各种稀土元素性质极其相似, 产地又同在极其复杂的矿中, 紧密共生, 使得分离的工作异常困难。因此, 18 世纪发现的稀土矿物很少, 当时的技术水平很难把它们分离成单独的元素, 只能把稀土作为混合氧化物分离出来。那时习惯上将不溶于水的固体氧化物称为 “土”, 例如, 将氧化铝称为 “陶土”, 氧化钙称为 “碱土” 等, 因此也将镧系元素和钇的氧化物称为 “稀土”。其实, 稀土既不 “稀少”, 也不像 “土”, 而是典型的金属元素, 其活泼性仅次于碱金属和碱土金属。从 1794 年发现钇土开始, 一直到 1974 年马林斯基 (J. A. Marinsky)、洛伦迪宁 (L. E. Gelendenin) 等用人工方法从核反应堆中的铀的裂变产物中提取稀土的最后一个元素钷 (原子序数为 61, 半衰期 2.64 年) 为止, 从自然界中取得全部稀土元素跨越了 3 个世纪, 共经历了 150 多年。

稀土元素由于其结构的特殊性而具有诸多其他元素所不具备的光、电、磁特性, 从而可以制备成许多能用于高新技术的新材料, 因此它被誉为新材料的 “宝库”。美国国防部公布的 35 种高技术元素, 其中包括了除 Pm 以外的 16 种稀土元素, 占全部高技术元素的 45.7%。日本科技厅选出 26 种高技术元素, 16 种稀土元素被包括在内, 占 61.5%。世界各国都在大力开展稀土应用技术研究, 几乎每隔 3~5 年就有一次稀土应用的新突破, 从而大大推动了稀土理论和稀土材料的发展。

1.1.2 稀土元素的分类

除钪以外的 16 个稀土元素, 根据它们的电子层结构以及由此反映的物理、化学性质上的某些差别, 可以分成两组, 即镧、铈、镨、钕、钷、钐、铕称为镧组稀土; 钆、铽、镝、铥、铒、铥、镱、镱和钇称为钇组稀土, 见表 1-1 所列。镧组稀土和钇组稀土习惯上也分别称为轻稀土和重稀土。尽管钇的相对原子质量仅有 89 (原子序数 39), 但由于钇的原子半径在重稀土元素范围内 (在铥与铒的离子半径附近), 化学性质与重稀土更相似, 在自然界中

常与重稀土共生共存，所以把钇归为重稀土组。根据稀土的分离工艺，又可将稀土元素分为三组：铈组稀土、铽组稀土和钇组稀土；或分别称轻稀土、中稀土、重稀土。组间的界线随稀土分离工艺的不同而稍有差别。例如，按照硫酸复分离工艺，组间的界线在钐-铈和铽-钇；按照二(2-乙基己基)膦酸（即 P₂₀₄）萃取分离工艺，组间的界线则在铈-钐和钐-铽，这样，镧、铈、镨、钕称为轻稀土，钐、铈、钐为中稀土，铽、铈、钐、钐、钐、钐、钐、钐再加上钇称为重稀土，这是目前常用的分类方法。

表 1-1 稀土元素的分组

57 镧 La	58 铈 Ce	59 镨 Pr	60 钕 Nd	61 钷 Pm	62 钐 Sm	63 铕 Eu	64 钆 Gd	65 铽 Tb	66 镱 Dy	39 钇 Y	67 铈 Ho	68 铈 Er	69 铈 Tm	70 铈 Yb	71 镱 Lu
轻稀土(铈组)						重稀土(钇组)									
铈组 (硫酸复盐难溶)					铽组 (硫酸复盐微溶)					钇组 (硫酸复盐可溶)					
轻稀土 (P ₂₀₄ 弱酸萃取)					中稀土 (P ₂₀₄ 低酸度萃取)					重稀土 (P ₂₀₄ 中酸度萃取)					

1.2 稀土矿物资源

1.2.1 自然界的稀土元素

稀土元素在地壳中的分布很广，数量也不少，17种稀土元素的总量在地壳中占0.0153%（质量分数），即153g/t。各种元素在地壳中的质量分数见表1-2所列。

表 1-2 各元素在地壳中的质量分数

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%	元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
O	47.2	Ni	0.008	Hf	3.2×10 ⁻⁴	Os	5×10 ⁻⁶
Si	27.6	Li	0.0065	B	3×10 ⁻⁴	Te	1×10 ⁻⁶
Al	8.8	Zn	0.005	Mo	3×10 ⁻⁴	Pd	1×10 ⁻⁶
Fe	5.10	Ce	0.0046	U	3×10 ⁻⁴	Tc	1×10 ⁻⁶
Ca	3.60	Sn	0.004	Tl	3×10 ⁻⁴	Ru	5×10 ⁻⁷
Na	2.64	Co	0.003	Yb	2.66×10 ⁻⁴	Pt	5×10 ⁻⁷
K	2.60	Y	0.0028	Er	2.47×10 ⁻⁴	Au	5×10 ⁻⁷
Mg	2.10	Nd	0.00239	Ta	2×10 ⁻⁴	Ne	5×10 ⁻⁷
Ti	0.60	La	0.0018	Br	1.6×10 ⁻⁴	Rh	1×10 ⁻⁷
H	0.15	Pb	0.0016	Ho	1.15×10 ⁻⁴	Re	1×10 ⁻⁷
C	0.10	Ga	0.0015	Eu	1.06×10 ⁻⁴	Ir	1×10 ⁻⁷
Mn	0.09	Nb	0.001	W	1×10 ⁻⁴	Xe	3×10 ⁻⁸
P	0.08	Tb	8×10 ⁻⁴	Tb	9.1×10 ⁻⁵	Kr	2×10 ⁻⁸
S	0.05	Ge	7×10 ⁻⁴	Lu	7.5×10 ⁻⁵	Pa	1×10 ⁻¹⁰
Cl	0.045	Cs	7×10 ⁻⁴	Se	6×10 ⁻⁵	Ra	1×10 ⁻¹⁰
Cr	0.04	Sm	6.47×10 ⁻⁴	Cd	5×10 ⁻⁵	Po	2×10 ⁻¹⁴
Rb	0.03	Gd	6.36×10 ⁻⁴	Sb	4×10 ⁻⁵	Ac	6×10 ⁻¹⁴
F	0.027	Be	6×10 ⁻⁴	I	3×10 ⁻⁵	Pu	1×10 ⁻¹⁵
Sr	0.02	Pr	5.53×10 ⁻⁴	Tm	2×10 ⁻⁵	Rn	7×10 ⁻¹⁶
Zr	0.02	As	5×10 ⁻⁴	Bi	2×10 ⁻⁵	Pm	4.5×10 ⁻²⁰
V	0.015	Sc	5×10 ⁻⁴	In	1×10 ⁻⁵		
Cu	0.01	Dy	4.5×10 ⁻⁴	Ag	1×10 ⁻⁵		
N	0.01	Ar	4×10 ⁻⁴	Hg	7×10 ⁻⁶		

稀土元素在地壳中的分布有如下特点。

① 稀土元素在地壳中的总分布为 0.0153%，其丰度比一些常见元素还要多，如比锌大 3 倍，比铅大 9 倍，比金大 3 万倍。就单一元素来说，分布最多的是铈，其次是钇、铈、镧等，多数稀土元素比铈和钨的含量还要高。

② 在地壳中铈组元素的丰度比钇组元素要大。前者在地壳中的丰度为 101g/t，后者约为 47g/t。

③ 稀土元素的分布是不均匀的，一般服从 Oddo-Harkins 规则，即原子序数为偶数的元素其含量较相邻的奇数元素的含量大。但有的矿物也有例外，如我国某些离子吸附型矿物中镧的含量却比原子序数为偶数的铈高。

④ 稀土属于亲石元素，在地壳中稀土元素集中于岩石圈中，主要集中于花岗岩、伟晶岩、正长岩的岩石中，特别是在碱性岩浆岩中更加富集。稀土的钇组元素和花岗岩岩浆结合得紧密，倾向于出现在花岗岩类有关的矿床中，而铈组元素倾向于出现在不饱和的正长岩岩石中。

稀土元素不仅存在地壳中，而且在海、月球表面也有发现，但含量很少。

1.2.2 稀土元素在矿物中的赋存状态

稀土元素多以离子化合物形式赋存于矿物晶格中，呈配位多面体形式，其氧离子配位数一般为 6~12。稀土元素在矿物晶格一般呈三价状态出现，但也有以二价态的铈和铈、四价态的铈和铈出现。由于稀土元素结构相似性，它们紧密结合共存于相同的矿物中。它们在矿物中有三种赋存状态。

① 参加晶格，构成矿物不可缺少的部分，即稀土矿物，如独居石、氟碳铈矿等。

② 以类质同晶置换（钙、锶、钡、锰、锆、钍等）形式分散于造岩矿物中，如磷灰石、钛铀矿等。

③ 呈离子吸附状态存在于一些矿物表面和颗粒之间，如黏土矿物、云母矿等。我国赣南（如龙南、寻乌等地）及与赣南相邻的闽、粤、湘地区的稀土矿就属于这种类型，它们无需选矿，就很容易从原矿中提取。

稀土元素，特别是钇和钇组稀土在地壳中有大量富集，富集的规律受到各地区具体地质条件所控制，因而出现了富含某些稀土元素的稀土矿物。

1.2.3 稀土的主要工业矿物

自然界中含稀土矿物有 200 多种，但有工业价值的只有 50 余种。目前工业上实际利用的稀土矿物却只有 10 种左右。随着稀土元素用途的扩大和用量的增加以及科学技术的发展，稀土工业使用的矿物数量也将会增加。地壳中的稀土矿物，大都是离子型化合物。稀土离子是亲氧性较强的过渡型离子，所以大部分稀土矿物以各种氧化物及含氧酸盐的形式出现。例如氧化物矿物中的褐钇铋矿、铋钇矿、铈易解石和钇易解石、黑稀金矿和复稀金矿、含稀土的烧绿石；氟碳酸盐类矿物中的氟碳铈矿、黄河矿、氟碳钙铈矿等；磷酸盐类矿物中的独居石、磷钇矿、磷灰石；硅酸盐类矿物中的硅铈矿、褐帘石、硅钍铈矿、兴安矿、铈硅磷灰石和钇硅磷灰石等。稀土矿物的工业意义是相对、有条件的，除矿物本身稀土含量较高和易选冶回收外，还要视其所在地区的技术和经济条件。在 10 种左右的稀土原料矿物中，轻稀土的原料矿物主要是氟碳铈矿和独居石；重稀土的原料矿物主要有磷钇矿、褐钇铋矿、钛铀矿和离子吸附性稀土矿等。稀土工业生产使用的几种主要的稀土矿物质量分数和性质见表 1-3 所列。

表 1-3 主要的稀土工业矿物及其一般性质

矿物名称	化学式	稀土含量/%	晶型	颜色	硬度	相对密度
氟碳铈矿 bastnaesite	(Ce,La)(CO ₃)F	74.77	六方	黄,浅绿,赤褐	4~5.2	4.72~5.12
独居石 monazite	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄	65.13	单斜	黄,黄棕,黄绿,褐	5~5.5	4.9~5.5
磷钇矿 xenotime	(Y,Ce,Er)PO ₄	61.40	正方	浅黄,黄褐	4~5	4.3~4.83
褐钇铌矿 fergusomite	YNbO ₄	39.94	单斜	黑,黄褐	5.5~6.5	4.5~5.76
氟钙铈钇石 gaggarinite	NaCaYF ₆	56.75	(粒状)	黄,玫瑰色	4.5	4.18~4.21
硅铈钇矿 gadolinite	YFeBeSi ₂ O ₁₀	51.51	单斜	黑绿,褐,绿	6.5~7	4~4.5
黑稀金矿 euxenite	(Y,Ce,Ca,U,Th) (Nb,Ta,Ti) ₂ O ₂	20.82	(柱状板状)	浅绿,黄褐,黑色	5.5~6.5	4.3~5.87
钇萤石 yttrion fluorit	(Ca,Y)F ₂	17.50	(粒状)	浅黄,绿	4.5	3.5
兴安矿 xingganite	(Y,Ce)BeSiO ₄ (OH)	54.57	(短柱状)	白,浅绿色	4.42	5~5.5

稀土矿物中的稀土元素含量因产地不同而波动较大,有些以含铈组元素为主,如氟碳铈矿、独居石,它们是目前世界上提取铈组元素的工业原料;另一些矿物则以钇组元素为主,如磷钇矿、褐钇铌矿和黑稀金矿等,它们是提取钇组元素的工业原料。一些重要稀土矿物的稀土元素配分列于表 1-4。

表 1-4 几种重要稀土精矿的稀土元素配分 (REO)

%

稀土元素	氟碳铈矿		独居石		磷钇矿		混合型稀土矿 ^①	褐钇铌矿	兴安矿	离子吸附型稀土矿	
	中国包头	美国	澳大利亚	印度	马来西亚	中国广东	中国内蒙古	中国姑婆山	中国内蒙古	寻乌轻稀土型	龙南重稀土型
La	24.93	32.00	23.90	23.00	0.50	0.95	21.52	0.69	10.93	31~40	2~5
Ce	51.45	49.00	46.03	46.00	5.00	1.75	49.87	2.07	29.56	3~7	0.3~2
Pr	5.41	4.40	5.05	5.50	0.70	0.47	5.97	0.77	4.28	7~11	1~2
Nd	17.41	13.50	17.38	20.00	2.20	1.86	21.06	3.36	15.58	26~35	3~5
Sm	1.09	0.50	2.53	4.00	1.90	1.08	1.35	3.46	4.14	4~6	2~4
Eu	<0.30	0.10	0.05	—	0.20	0.08	<0.29	0.59	<0.30	0.5	0.12
Gd	<0.30	0.30	1.49	—	4.00	3.43	<0.31	6.44	4.15	4.0	6.0
Tb	<0.29	0.01	0.04	—	1.00	1.00	<0.20	2.00	0.75	0.3~0.5	1~1.5
Dy	<0.30	0.03	0.69	—	8.70	8.83	<0.23	8.59	4.64	2.0	5~7
Ho	0.008	0.01	0.05	—	2.10	2.13	0.007	4.02	0.78	0.4	1.7
Er	0.008	0.01	0.21	1.50	5.40	7.00	0.007	5.19	1.63	0.8~1.0	4~5
Tm	—	0.02	0.01	—	0.90	1.13	—	2.10	<0.30	0.1~0.3	<1.0
Yb	0.004	0.01	0.12	—	6.20	5.90	0.0003	5.36	0.72	0.6	3~4
Lu	0.01	0.01	0.04	—	0.40	0.78	0.09	1.91	<0.30	0.13	0.4
Y	0.313	0.10	2.41	—	60.80	63.61	0.31	53.39	22.63	9.0~11	64.0

① 为氟碳铈矿-独居石混合型精矿。

1.2.3.1 氟碳铈矿

氟碳铈矿是最重要的稀土工业矿物之一,经常与萤石、重晶石矿物共生。中国包头的白云鄂博矿和美国加利福尼亚的芒廷帕斯矿是世界上两个最大的氟碳铈矿,中国四川、山东及华南各地也都有规模可观的氟碳铈矿。中国某些氟碳铈矿的主要化学成分列于表 1-5。

表 1-5 中国某些氟碳铈矿的主要化学成分

产地及矿号	包头白云鄂博矿			姑婆山矿	云南某矿	广东阳春矿
	东 1592-1	B100	主体矿			
CeO ₂ (La, Nd...) ₂ O ₃	70.24	33.74 32.55	27.16 47.10	74.6 1.56 (Y ₂ O ₃)	68.84	63.00
CO ₂	22.12	17.82	16.18	10.39	19.89	18.11
F	9.76	6.42	7.31	8.17	4.68	7.79
—O—F ₂	4.10		3.08	3.44		3.28
ThO ₂	1.34	0.02	0.11	1.52	0.55	2.65
SiO ₂ (P ₂ O ₅)		0.98	0.11	(0.25)	2.09 (2.76)	1.20
Fe ₂ O ₃	0.25	0.84	0.49	0.95		3.14
Al ₂ O ₃	0.01	0.64	0.47	0.73		1.34
CaO	0.17	1.46	0.69	1.18		2.81

中国白云鄂博稀土矿是与独居石等矿共生矿物，主要为铈组稀土，常含有钍，机械混入物往往有硅、铁、铝等。华南几处的氟碳铈矿也含有相当量的钍。美国芒廷帕斯的氟碳铈矿和中国山东微山氟碳铈矿以及四川攀西氟碳铈矿都是单一的氟碳铈矿，具有易开采、易选、易冶炼等特点，具有重要的工业价值。

1.2.3.2 独居石

独居石也是稀土原料矿物中最重要的矿物，而且在资源方面的分布也是最广的，除我国外，印度、巴西、澳大利亚、美国、南非、埃及、锡兰、马来西亚和朝鲜等国都是独居石的重要产地。独居石的化学成分根据产地有所不同，见表 1-6 所列。

表 1-6 独居石的化学成分

/%

组分	REO	CeO ₂	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	U ₃ O ₈	ThO ₂
产地							
中国中南某地	60.30		(31.50)	21.52	1.46	0.22	4.72
中国内蒙古	65.91		(26.94)	30.63	0.69		0.38
印度	58.60		(30.10)	27.20	1.71	0.29	9.80
巴西	59.20		(26.00)	20.80	2.20	0.17	6.50
澳大利亚	61.33	28.11	(26.28)		1.10	0.34	6.55
美国	40.70		(19.30)	(4.47 Fe ₂ O ₃)	8.30	0.41	3.10
马来西亚	59.65	28.33	(25.70)			0.24	5.90
泰国	57.62	26.73	(26.34)			0.44	7.88
韩国	60.20	27.42	(26.52)			0.45	5.76
朝鲜	42.65	20.55	(18.44)			0.18	4.57

独居石含有稀土磷酸盐，其中铈占稀土总量的 40% 以上，钇组稀土仅占 5%，并含有少量的铀和数量可观的钍，所以它是作为稀土和钍在工业上最经济的一种原料矿物。

1.2.3.3 混合型稀土矿

混合型稀土矿是氟碳铈矿和独居石的混合型矿物。稀土的化学成分主要为氟碳酸盐和磷酸盐（含量为 6 : 4 ~ 8 : 2），其中 La ~ Eu 的轻稀土氧化物的含量占稀土氧化物总量的 97% 左右，重稀土中 Y₂O₃ 约占 0.4%，其他元素含量甚微。在矿物中还含有 Nb、Fe、Mn 等多种元素，U、Th 含量比独居石低，具有重要的综合利用价值。我国的白云鄂博矿是极具典型意义的轻稀土型氟碳铈矿和独居石组成的混合矿，也是目前世界上探明储量及开采量最大

的特大型轻型稀土矿床，目前其稀土产量占我国稀土总量的70%以上，因此在我国乃至世界稀土工业中占据举足轻重的地位。

1.2.3.4 磷钇矿

磷钇矿、(Y, 钇组元素) PO₄ 与独居石同属磷酸盐矿，但以钇组稀土为主，见表 1-7 所列。

表 1-7 中国几个磷钇矿的主要化学成分

/%

矿名 化学成分	内蒙古 (046) ^①	内蒙古 (94) ^①	内蒙古 (Z1) ^①	花山花岗岩	西华山花岗岩
Y ₂ O ₃	63.06	62.13	62.63	59.52	62.72
Ce ₂ O ₃	0.47	1.18	0.20	2.50	
P ₂ O ₅	34.32	31.76	35.31	33.93	33.01
ThO ₂	1.32	1.96	1.01	0.31	0.69
SiO ₂	0.40	1.11	0.21	1.05	1.58
Fe ₂ O ₃	痕	0.51	0.36	0.86	0.82
Al ₂ O ₃		1.48	0.04	0.79	0.29
CuO	0.06	痕	0.09	0.31	0.36
MgO	痕	痕	痕	0.07	

① 为花岗伟晶岩中。

1.2.3.5 褐钇铌矿

褐钇铌矿为钽铌酸盐，这类矿物中有富铌、富钽、富铈族稀土及富钇族稀土，因此出现不同的种名。此外，尚含有放射性元素铀、钍及钙、镁、铁、铝、硅、钛、锡等元素，见表 1-8 所列。

表 1-8 中国某些褐钇铌矿的主要化学成分

/%

化学成分	姑婆山花岗岩				白云鄂博 西部产出
	一期产出	二期产出	三期产出	伟晶岩状产出	
Nb ₂ O ₅	42.71	42.30	43.00	42.10	46.55
Ta ₂ O ₅	2.84	1.70	2.20	2.20	0.30
Y ₂ O ₃	33.06	37.79	43.78	33.56	40.04
Ce ₂ O ₃	5.85	3.96	2.73	3.74	11.54
UO ₂	4.05	2.20	2.98	2.58	1.25
U ₃ O ₈		3.20	3.21	3.60	
ThO ₂	1.09	2.07	1.52	1.73	1.21
Fe ₂ O ₃	1.16	1.04	0.86	1.00	
Al ₂ O ₃	1.87	1.20	1.10	1.00	0.14
SiO ₂	1.17	1.66	1.42	2.04	0.12
TiO ₂	1.82	1.44	1.06	1.34	0.41

1.2.3.6 离子吸附型稀土矿

它是我国独特的新型稀土矿，在稀土资源中，离子吸附型稀土矿的经济价值是目前最高的。这类稀土矿的主要产地是在江西赣南及其邻省广东、湖南、福建等地区。在这类矿物中，稀土以离子吸附态被风化壳的高岭土等硅铝酸盐矿物所吸附，它可分为以轻稀土为主和以重稀土为主的两类矿物。矿物中钪的含量高于铈，铈的含量比其他矿物的高。重稀土矿中含有85%的重稀土，有相当高的钇含量，这是我国重稀土生产的主要工业原料。它们的稀土含量和稀土元素的配分见表 1-9 所列。

表 1-9 离子吸附型稀土矿中稀土含量

/% (质量分数)

稀土氧化物	重稀土型	轻稀土型	稀土氧化物	重稀土型	轻稀土型
RE ₂ O ₃ ^①	0.136	0.20	Tb ₄ O ₇	1.1~1.6	0.6
La ₂ O ₃	4.1~4.2	36.1	Dy ₂ O ₃	7.2~9.5	2.6
CeO ₂	2.4~4.1	4.4	Ho ₂ O ₃	1.6~3.2	<0.4
Pr ₆ O ₁₁	1.2~1.5	8.7	Er ₂ O ₃	4.3~5.1	1.2
Nd ₂ O ₃	5.3~6.4	25.9	Tm ₂ O ₃	0.3~0.7	0.1
Sm ₂ O ₃	2.4~2.7	5.1	Yb ₂ O ₃	3.3~4.2	0.9
Eu ₂ O ₃	<0.18	0.5	Lu ₂ O ₃	0.4~0.7	<0.1
Gd ₂ O ₃	6.5~7.3	4.8	Y ₂ O ₃	53~65	13.5

① 原矿中的 RE₂O₃ 的含量。

离子吸附型稀土矿物的放射性元素含量低。容易开采，提取工艺简便，成本低。

1.2.4 世界稀土资源概况

稀土元素在地壳(以厚度 16km 计)中的分布十分广泛,其储量也很大,根据美国地质局调查报告统计数字表明,世界稀土资源又有了新的增长,世界各国稀土资源储量、远景储量和矿产量见表 1-10 所列。

表 1-10 世界稀土资源储量、远景储量和矿产量 (2000 年, REO)

/t

国家	储量	远景储量	矿产量	国家	储量	远景储量	矿产量
美国	13000000	14000000	5000	马来西亚	30000	35000	250
澳大利亚	5200000	5800000		俄罗斯	19000000	21000000	2000
巴西	280000	310000	1400	南非	390000	400000	
加拿大	940000	1000000		斯里兰卡	12000	13000	120
中国	43000000	48000000	70000	其他国家	21000000	21000000	
印度	1100000	1300000	2700	总计	103952000	112858000	81470

从表 1-10 可以看出,世界稀土资源储量约为 1 亿吨,远景储量超过 1.1 亿吨,相对集中于中国、美国、俄罗斯、澳大利亚、印度和加拿大等国。其中稀土内生矿床主要产于碱性岩-碳酸岩中,集中分布在中国的白云鄂博、美国的芒廷帕斯(Mountaintain Pass)和澳大利亚的韦尔德山(Weld Mountain)等地,这三个矿山占世界稀土总储量的 90% 以上。稀土的外生矿床主要是海滨砂矿,沿非洲东海岸、印度西海岸、中国东南沿海、马来半岛、印度尼西亚、澳大利亚东西海岸及巴西沿海带分布。

国外已查明的稀土总储量中以矿物类型计,其中氟碳铈矿占 50.6%,独居石和磷钇矿占 46.7%,其他矿物占 2.7%。美国的芒廷帕斯的氟碳铈矿不但储量巨大,而且矿石中稀土品位很高,其 REO 品位为 4%~10%,其精矿产品中,REO 为 50%~70%,Y₂O₃ 为 0.1%,Eu₂O₃ 为 0.01%。印度、东南亚、澳大利亚等地的独居石配分中的 Y₂O₃ 和 Eu₂O₃ 比美国的氟碳铈矿都高。加拿大北部沥青铀矿副产稀土,产品配分中含 Y₂O₃ 为 50%,具有很高的工业价值。

稀土是我国的优势矿物资源,概括起来我国稀土资源有如下五大特点。

(1) 储量大 我国稀土矿产工业储量和远景储量均居世界首位,内蒙古自治区的白云鄂博一带的稀土矿床是目前世界上探明储量和开采量最大的特大型稀土矿。

(2) 分布广 稀土矿物遍及我国十多个省、自治区。北方有白云鄂博的特大型矿床和山东等地的氟碳铈矿,南方有种类繁多的独居石、磷钇矿和我国特有的离子吸附型稀土矿,还有一些星罗棋布的小型稀土矿床,为我国稀土工业合理布局提供了有利条件。